

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

**ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DE UMA MISTURA DE SÓLIDOS EM UM LEITO
FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO**

Felipe Antunes Calvi

Prof. Dr. Francisco José dos Santos

Rio Claro (SP)

2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

FELIPE ANTUNES CALVI

ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DE UMA MISTURA DE SÓLIDOS EM UM
LEITO FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Câmpus
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Licenciado em Física.

Rio Claro — SP

2013

532 Calvi, Felipe Antunes
C168e Estudo da fluidodinâmica de uma mistura de sólidos em
um leito fluidizado gás-sólido / Felipe Antunes Calvi. - Rio
Claro, 2013
38 f. : il., figs., gráfs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (licenciatura - Física) -
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e
Ciências Exatas
Orientador: Francisco José dos Santos
Coorientador: Marcello Gonçalves Rodrigues
Coorientador: Roberto Eugenio Lagos Monaco

1. Mecânica dos fluídos. 2. Fluidização. I. Título.

Termo de Aprovação

FELIPE ANTUNES CALVI

ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DE UMA MISTURA DE SÓLIDOS EM UM LEITO FLUIDIZADO GÁS-SÓLIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho” - Câmpus de Rio Claro, para obtenção do grau
de Licenciatura em Física

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Francisco José dos Santos (orientador)

Prof. Dr. Marcello Gonçalves Rodrigues

Prof. Ti Roberto Eugenio Lagos Monaco

Rio Claro, 14 de novembro de 2013.

Felipe Antunes Calvi

Prof. Dr. Francisco José dos Santos

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente aos meus pais, Emília e Pedro, pelo amor incondicional, pelo apoio em todos os momentos, pelo carinho sempre a mim dedicado, pela compreensão nesses 4 anos morando longe de casa, e por todos os esforços para que eu possa estar aqui hoje. Aos meus queridos avós, Ione e Nelson, pelo amor, a ajuda e compreensão em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco José dos Santos, pela paciência, apoio e competência durante todo o período de orientação deste trabalho. E aos amigos e colegas, que estiveram ao meu lado nestes quatro anos.

RESUMO

A fluidização consiste em fazer que um leito de partículas sólidas adquira comportamento fluido utilizando-se um fluido (ar em nosso caso) escoando através das partículas sólidas. Em virtude disso, consegue-se uma boa mistura desses materiais, bem como um aumento das taxas de transporte de calor e massa. O deslocamento do fluido pelos espaços entre as partículas gera uma velocidade que, se muito baixa, não promove movimentação do material particulado. O aumento gradativo da velocidade vai gerando pequenas vibrações entre as partículas que começar a afastarem-se uma das outras. Nosso estudo irá se concentrar no instante seguinte, quando a velocidade do fluido atinge um estado onde as forças de arrasto são suficientes para suportar o peso dos sólidos particulados fazendo com que esses sólidos comportem-se como fluidos. O conhecimento da velocidade mínima necessária para fluidizar as partículas envolvidas é de extrema importância uma vez que abaixo desta velocidade o leito não fluidiza; e muito acima dela, os sólidos são carregados para fora do leito. O reator de leito fluidizado, é muito utilizado na Física e Engenharias, em particular na fluidização gás-sólido, com ênfase em processos termoquímicos.

Palavras Chave: Fluidização, Fluidodinâmica, Leito fluidizado gás-sólido.

ABSTRACT

Fluidization consists in a bed of solid particles acquire fluid behavior by using a fluid (in this case air) flowing through the solid particles. Because of this, it can be a good mix of these materials, as well as to show increased rates of heat and mass transport. The fluid flowing through the spaces between the particles gives an interstitial velocity, that if is too low does not cause movement of the particulates. The gradual increase in speed will generate small vibrations between the particles promotes its fluidization. Our study focus in the fluid state of solid bed , when the fluid velocity reaches a state where the drag forces are sufficient to support the weight of the solid particles making these solids behave like fluids . Knowledge of the minimum velocity required to fluidize that particles is of great importance since below this speed there is no fluidization, and far above it, the solids are carried out of the bed. The fluidized bed reactor is widely used in physics and engineering, particularly in gas-solid fluidization, with emphasis on thermochemical processes.

Keywords: Fluidization, Fluidynamics, Gas-solid fluidized bed.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.Fundamentos da fluidização	2
1.2.Objetivos do projeto	8
2. MÉTODO EXPERIMENTAL	10
2.1. Distribuição granulométrica e diâmetro característico dos inertes do leito.....	10
2.2. Velocidade mínima de fluidização — U_{mf}	11
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	13
3.1. Obtenção da distribuição granulométrica das amostras utilizadas	13
3.2. Obtenção das densidades das amostras.....	16
3.3. Obtenção da porosidade das partículas	17
3.4. Obtenção da velocidade mínima de fluidização — U_{mf}	17
3.4.1. Velocidade mínima de fluidização pelo método gráfico	17
3.4.2. Velocidade mínima de fluidização pelo método analítico.....	19
3.5. Comparando as amostras	20
4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
5. REFERÊNCIAS	26
6. ANEXOS.....	27
6.1. Anexo A — Gráficos de distribuição granulométrica	27
6.2. Anexo B — Gráficos da velocidade mínima de fluidização (U_{mf}).....	30

1. INTRODUÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo estudar os conceitos básicos de fluidização, e analisar como as propriedades físicas de uma mistura de sólidos particulados inertes, influenciam a fluidodinâmica de um leito fluidizado gás-sólido. A fluidização caracteriza-se pelo contato entre as partículas sólidas e uma corrente de fluido ascendente proporcionando altas taxas de transferência de calor e massa. É um processo utilizado amplamente em métodos industriais físicos, como secagem e recobrimento de partículas, químico, como reações catalíticas e fermentação, e termoquímicos, como pirólise, gaseificação e combustão.

Para entender o fenômeno, vamos imaginar um amontoado de partículas sobre uma placa perfurada. Imaginemos uma corrente de gás atravessando o leito de partículas no sentido ascendente, como vemos na Figura 1.1.

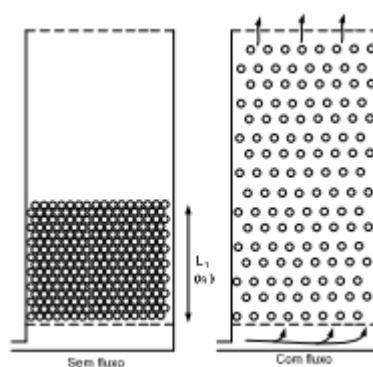


Figura 1.1 — Leito de partículas percolado por uma corrente gasosa ascendente.

Fonte: Bojorge (2009)

Com uma baixa velocidade do gás, ele escoar nos espaços entre as partículas, sem promover movimentação do material — é uma simples percolação e o leito permanece fixo. À medida que se aumenta a velocidade do gás, as partículas afastam-se e algumas começam a apresentar uma leve vibração — tem-se nesse momento um leito expandido. Com velocidade ainda maior, atinge-se uma condição em que a soma das forças causadas pelo escoamento do gás no sentido ascendente igualam-se ao peso das partículas. Nessa situação, em que o movimento do material é mais vigoroso, atinge-se o que se chama de leito fluidizado (NITZ & GUARDANI, 2008).

Portanto, a fluidização acontece no momento em que um fluxo de fluido, gás ou líquido, ascendente através de um leito de partículas adquire velocidade suficientemente grande para suportar as partículas, sem arrastá-las junto com o fluido. Se a velocidade de escoamento aumenta, aumenta também a força de arrasto exercida sobre as partículas (SANTOS, 2010). No instante em que o leito se torna fluidizado, as partículas são reorganizadas pela força de arrasto, oferecendo menor resistência ao escoamento.

1.1. Fundamentos da fluidização

São estudados os conceitos básicos da Física para caracterização do regime de fluidização, como a velocidade mínima de fluidização, granulometria (d_p) do material particulado do leito, porosidade (ϵ) e a densidade (ρ_p) do leito. A razão entre o peso efetivo do leito e sua área da secção transversal, é a perda de carga através do leito. Na Figura 1.2, para velocidades de gás maiores que U_{mf} , o valor da perda de carga se mantém aproximadamente constante durante o intervalo de velocidades do gás, entre U_{mf} e a velocidade de transporte das partículas do leito. (SANTOS, 2010). Esta perda de carga pode ser estimada por:

$$\Delta P_{leito} \cdot A_T = (m/\rho_p)(\rho_p - \rho_g)g \quad (1.1)$$

Onde:

ΔP_{leito} é a variação da perda de carga através do leito; (N/m²)

m é a massa do conjunto de partículas do leito; (kg)

ρ_p é a densidade do material do leito; (kg/m³)

ρ_g é a densidade do gás de fluidização; (kg/m³)

A_T é a área da secção transversal do leito; (m²)

g é a aceleração da gravidade. (m/s²)

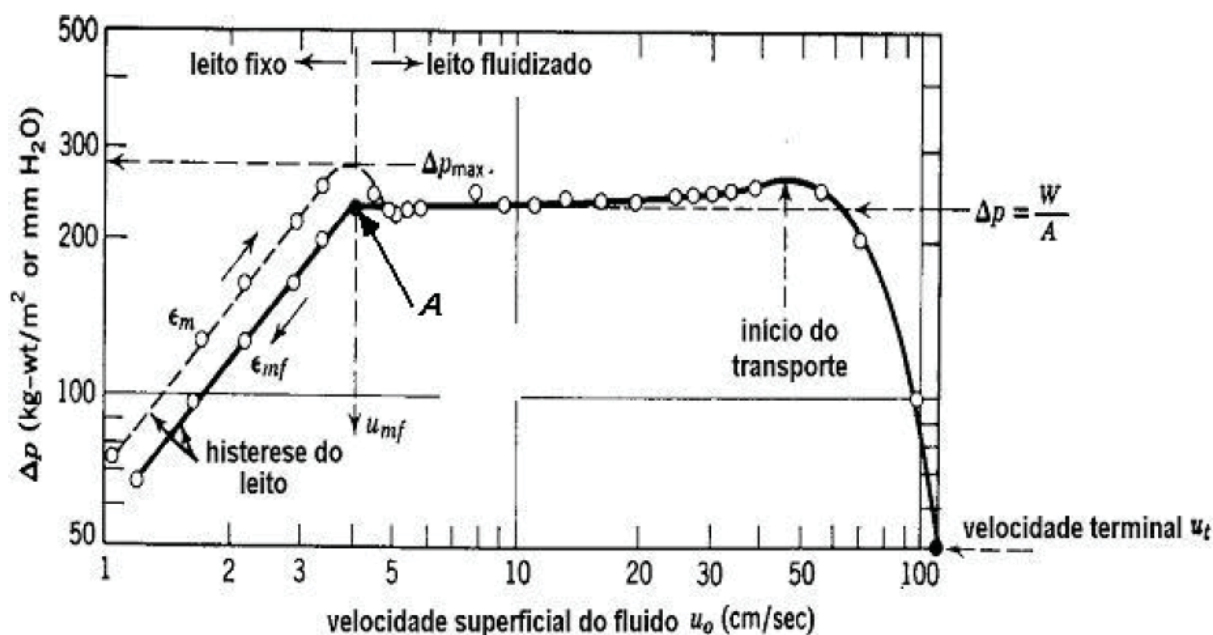


Figura 1.2 — Gráfico de perda de carga em função da velocidade do fluido.

Fonte: Kunii & Levenspiel (2009)

Não importa se o fluido é um líquido ou um gás, até o início da fluidização, o leito é expandido mais ou menos uniformemente. No entanto, se o fluido é um gás, a expansão uniforme é subitamente perdida (exceto para partículas muito finas $d_p < 0,1\text{mm}$), e o sistema torna-se instável, formando-se, dentro do leito, vazios que contêm poucos sólidos, preenchidos quase totalmente por gás de fluidização (SANTOS, 2010). Esses vazios são chamados de bolhas e são responsáveis por aumentar a recirculação das partículas dentro do leito, e por esta razão, o sistema fluidizado possui excelentes propriedades de transferência de calor.

Se a velocidade do fluido é levada além do regime de bolhas, o leito é levado a uma situação em que as partículas são arrastadas na corrente e carregadas para fora do leito. Isto pode ser verificado na Figura 1.3.

Analisando-se a variação da velocidade do gás, a fluidização borbulhante é o regime que se observa após a fluidização incipiente. No caso de partículas de pequeno tamanho, com densidade geralmente menor do que $1,4\text{ g/cm}^3$, ocorre uma expansão considerável do leito antes de surgirem as bolhas que caracterizam a fluidização borbulhante. (NITZ & GUARDANI, 2008).

No caso de partículas mais densas, entre $1,4 \text{ g/cm}^3$ e 4 g/cm^3 , a expansão do leito não vai muito além daquela adquirida na condição de fluidização incipiente e as bolhas já surgem com a velocidade de mínima fluidização (GELDART, 1973; KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

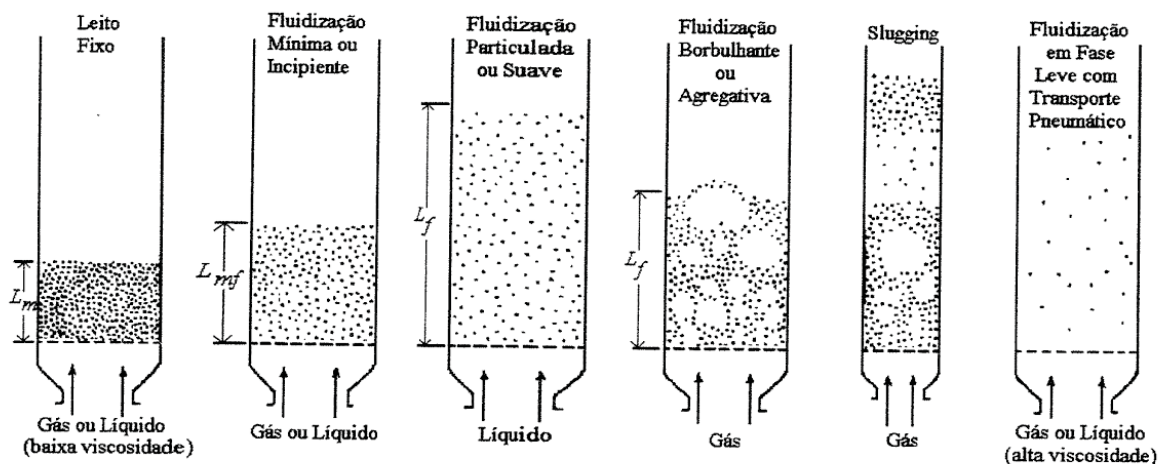


Figura 1.3 — Comportamento do leito de partículas, em função do aumento da velocidade do fluido.

Fonte: (Kunii & Levenspiel, 1991)

Em alguns leitos fundos em vasos de diâmetro reduzido surgem “slugs”, grandes bolhas formadas pela coalescência de bolhas menores, cujo diâmetro é equivalente ao diâmetro do leito e movimentam-se num fluxo pistonado. Nesse regime observam-se grandes flutuações na queda de pressão do gás. A fluidização turbulenta é um regime que antecede a condição de leito de arraste (ou fluidização rápida) e está além da fluidização borbulhante. Sua identificação e caracterização corretas ainda são um desafio. Na fluidização turbulenta, as oscilações de queda de pressão no leito diminuem, pois as grandes bolhas e espaços vazios desaparecem. O regime seguinte ao turbulento é o de fluidização rápida, que acontece quando a velocidade do gás excede a velocidade terminal de sedimentação das partículas e o material passa a ser arrastado. Com velocidades ainda maiores, suficientes para arrastar todo o material, atinge-se a condição de transporte pneumático. Para operar o sistema nessas condições deve haver uma operação subsequente de separação gás-sólido (NITZ & GUARDANI, 2008).

A Figura 1.4 ilustra os tipos de regime de fluidização em função da velocidade do fluido.

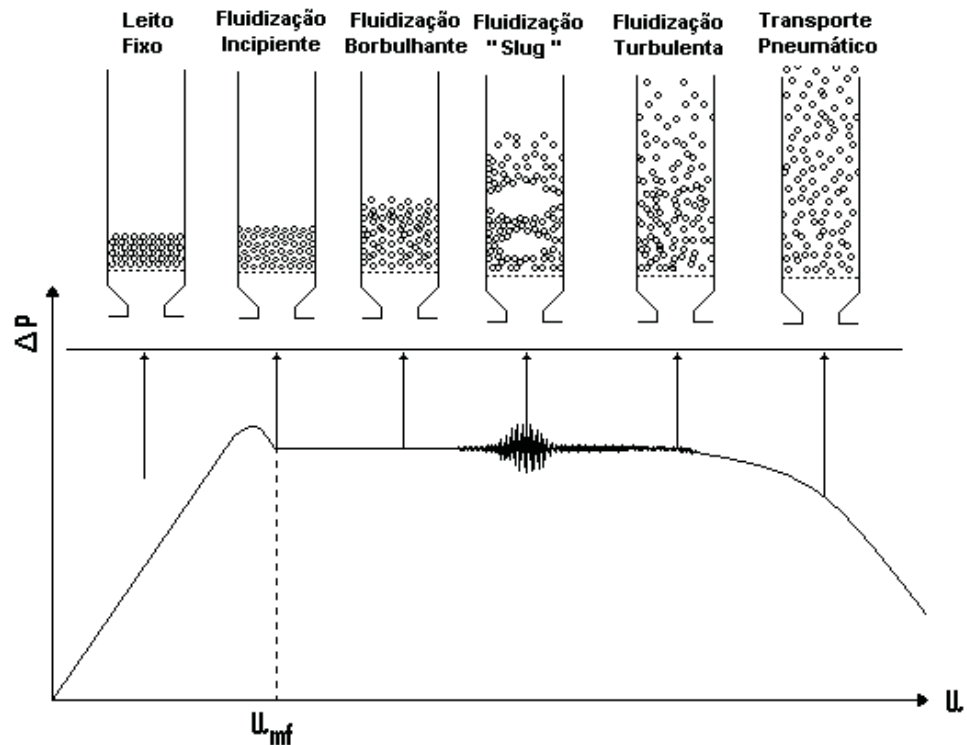


Figura 1.4 — Regimes de fluidização em função da velocidade superficial do fluido.

Fonte: Nitz & Guardani (2008)

Partículas menores são elutriadas a velocidades menores que as necessárias para elutrir partículas maiores, e a maneira pela qual as bolhas “explodem” na superfície do leito, lançando jatos de sólidos no espaço acima deste, afeta consideravelmente a taxa de perda de partículas por elutriação (SANTOS, 2010). O que se chama de fluidização é todo o intervalo compreendido entre fluidização incipiente e a turbulenta. Uma vez fluidizado, o leito apresenta algumas propriedades semelhantes às de um líquido em ebulição (NITZ & GUARDANI, 2008):

Os estados entre as condições extremas do leito fluidizado e a de carregamento e transporte de partículas é denominado regime de leito fluidizado borbulhante, durante o qual a perda de carga através do regime do leito é aproximadamente constante e suficiente para suportar o peso deste. A ação das bolhas, que provoca o alto grau de mistura das partículas no leito e a grande área superficial exposta por elas são responsáveis pela grande rapidez com que é atingido o equilíbrio térmico entre os sólidos e o gás. Por

causa de sua alta capacidade térmica em relação ao gás, as partículas no leito, sejam de combustível, sejam de sólidos, agem como fontes ou sorvedores de calor (SANTOS, 2010).

Em geral, a obtenção de boas taxas de transferência de calor e uma rápida mistura dos sólidos implica operar o reator com velocidades adequadamente maiores que U_{mf} .

A interação entre as bolhas com fase densa (amulsão), dentro do leito, é fortemente determinada pela densidade e granulometria do material particulado de que este é constituído. Isso pode ser mais bem entendido pela classificação proposta por Geldart (1972) (SANTOS, 2010).

Essa caracterização está representada na Figura 1.5, sendo tipo A partículas de pequeno tamanho médio (menores que 40 μm) e/ou baixa densidade — inferior a 1,4 g/cm^3 (pós finos e leves); tipo B são partículas com diâmetro compreendido entre 40 e 500 μm e densidade superior a 1,4 g/cm^3 (areia); tipo C, por sua vez, são partículas que possuem tendência coesiva, ou seja, à medida que a vazão de fluido aumenta, aparecem canais preferenciais da tela de distribuição do fluido até a superfície do leito; e tipo D são partículas de tamanho e/ou densidade elevada que necessitam de alta velocidade do fluido para fluidizarem.

Em algumas pesquisas recentes tem-se procurado analisar o comportamento fluidodinâmico de nanopartículas. O estudo de WANG, RAHMAN & RHODES (2007) é um exemplo. Os autores mostraram que nanopartículas comportam-se como material do tipo C, mas que podem passar para o tipo A com altas velocidades superficiais. O comportamento dessas partículas depende muito da intensidade das forças interpartículas (NITZ & GUARDANI, 2008).

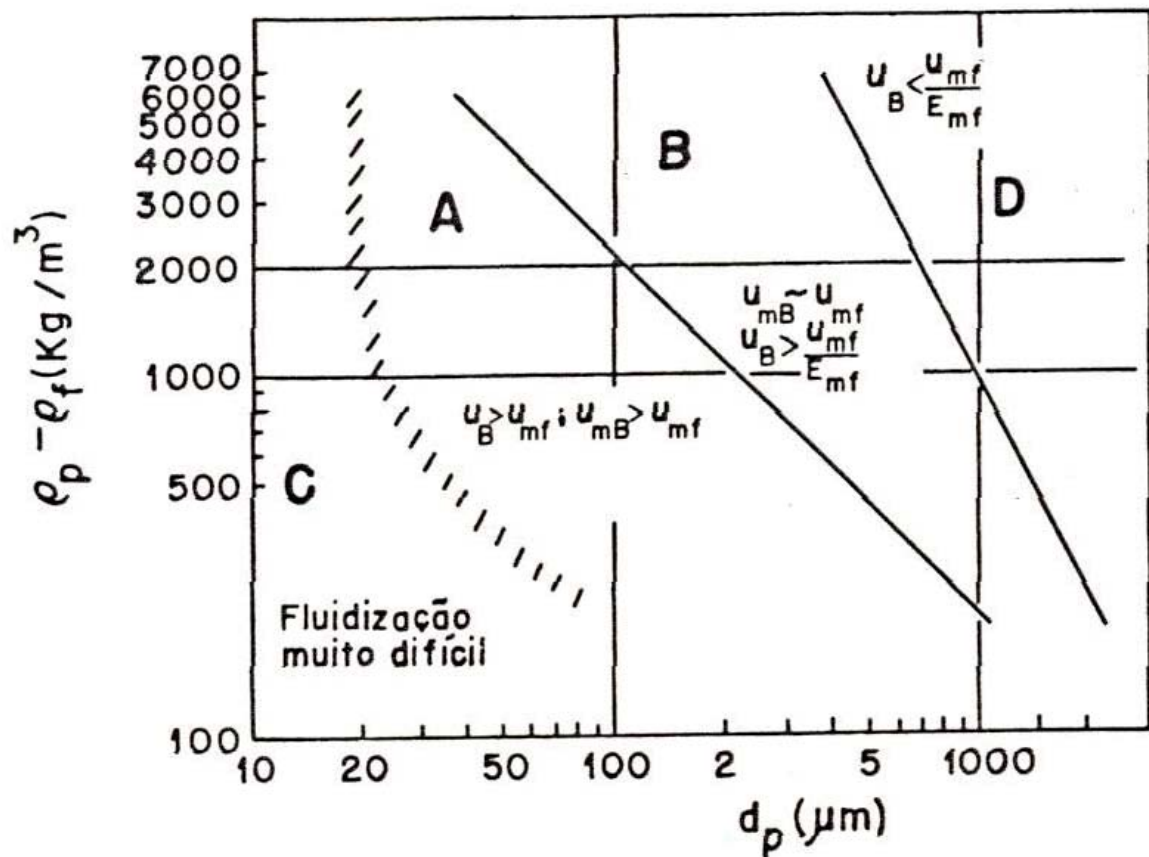


Figura 1.5 — Diagrama de Geldart, para classificação do material particulado do leito.

Fonte: Geldart (1972)

Associado às interações entre a fase de bolhas e a de emulsão, estudos experimentais de Lewis e Partridge (1967), Cranfield e Geldart (1974), mostraram que o padrão de escoamento de um gás associado com uma bolha, depende da razão entre velocidade de subida da bolha U_B , e a velocidade de mínima fluidização U_{mf} . Para razão $U_B/(U_{mf}/E_{mf})$, maior do que a unidade, i.e., para bolhas rápidas, forma-se uma região de recirculação de gás na fronteira da bolha com a fase densa. O gás na bolha recircula em seu interior e tem pequena penetração na fase densa. Quando a razão $U_B/(U_{mf}/E_{mf})$ é menor do que a unidade, i.e., para bolhas lentas, os gases da emulsão passam através da bolha, entrando pela sua base e saindo pelo topo (Santos, 2010).

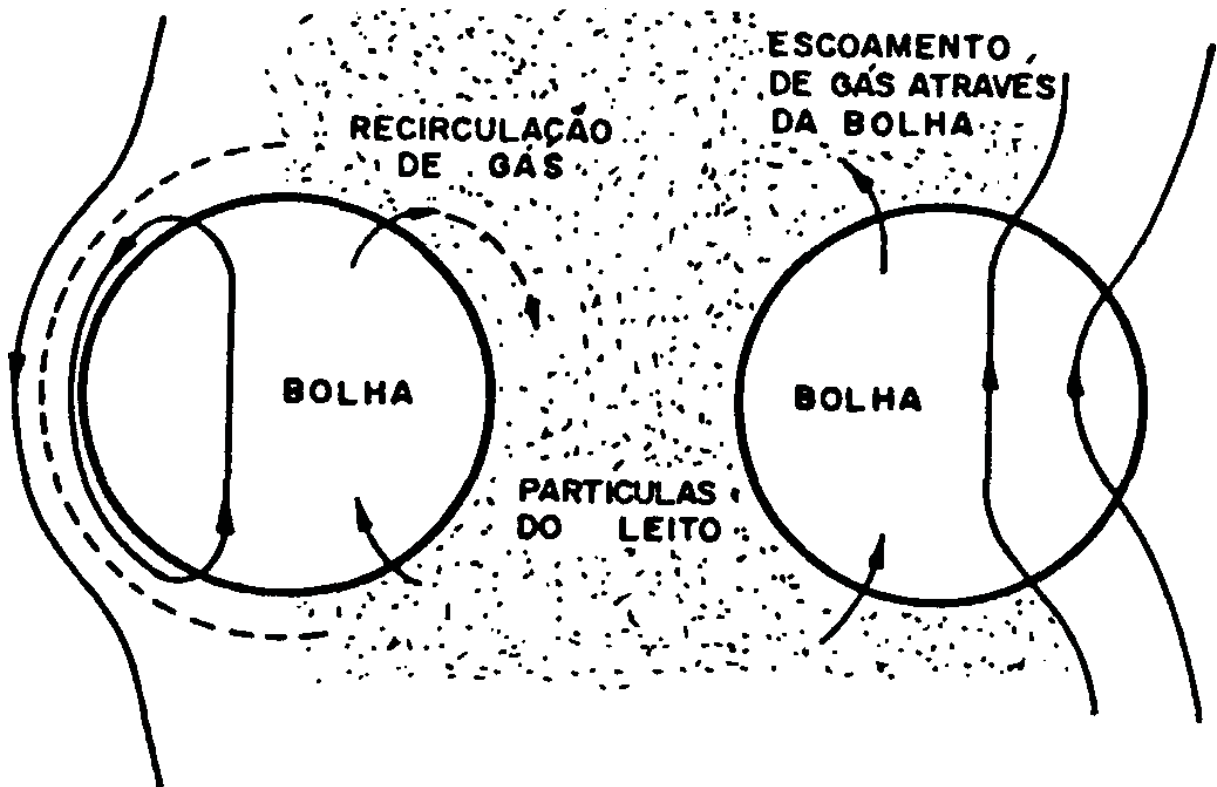


Figura 1.6 — Escoamento do gás de fluidização associado à fase de bolhas; a) à esquerda, bolha com $U_B/(U_{mf}/E_{mf}) > 1$, b) à direita, bolha com $U_B/(U_{mf}/E_{mf}) < 1$.

Fonte: Santos (2010)

1.2. Objetivos do projeto

Este trabalho tem como objetivo estudar os conceitos básicos de fluidização explicando o fenômeno da fluidização e analisar como as propriedades físicas de uma mistura de sólidos particulados inertes influenciam a fluidodinâmica de um leito fluidizado gás-sólido.

Realizar testes de caracterização fluidodinâmica de uma série de materiais sólidos particulados: 03 tipos de areias com granulometrias distintas, 01 tipo de areia rolada (origem, densidade e granulometria diferentes das outras areias), 02 tipos de alumina com diferentes granulometrias, e esferas de vidro.

Caracterizar esses materiais em relação a:

- Distribuição granulométrica: realizar testes de separação de grãos de diferentes tamanhos; utilizando-se peneiras com abertura de malhas padronizadas. Medir a porcentagem mássica correspondente as diferentes granulometrias que

compõem a mistura das amostras. Expressar os resultados em termos do diâmetro médio de duas peneiras consecutivas, através de histogramas de distribuição granulométrica;

- Caracterizar as amostras em termos de densidade aparente, densidade real e porosidade. Densidade aparente (ρ_a) é determinada pela razão entre massa e o volume externo das amostras. Densidade real (ρ_r) é determinada por picnometria e a porosidade das amostras obtém-se pela razão percentual entre o volume dos vazios do particulado em relação ao volume externo;
- Determinar a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) pelo método de perda de carga em função da vazão, utilizando-se um ventilador centrífugo, um conjunto de rotâmetros, um mini leito transparente e um manômetro de coluna de água.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

As atividades para realização para realização do projeto são listadas em sequência cronológica:

1. Estudo bibliográfico
2. Estudo dos possíveis equipamentos a serem utilizados;
3. Separação e peneiramento das amostras;
4. Caracterização das grandezas físicas básicas de cada uma das amostras;
5. Testes experimentais;
6. Comparação dos dados obtidos experimentalmente com os dados obtidos analiticamente.

Apresenta-se a seguir algumas fórmulas empíricas utilizadas na determinação das grandezas básicas utilizadas neste trabalho. Estas são as equações utilizadas para comparação das medidas obtidas em laboratório durante todo o período de pesquisa.

2.1. Distribuição granulométrica e diâmetro característico dos inertes do leito

Para um conjunto de esferas com N_{p1} esferas de diâmetro d_1 , N_{p2} esferas de diâmetro d_2 , e assim por diante, o diâmetro médio d_{sv} pode ser calculado como:

$$d_{sv} = \frac{N_{p1}d_1^3 + N_{p2}d_2^3 + \dots}{N_{p1}d_1^2 + N_{p2}d_2^2 + \dots} \quad (1.2)$$

$$d_{sv} = \frac{\sum x}{\sum x/d} \quad (1.3)$$

Onde, x é a fração mássica de partículas em cada intervalo de tamanho.

Quando trabalhamos com conjuntos de partículas obtidas por peneiramento, $d_1, d_2, \dots$ são representados pela média das aberturas adjacentes d_{pi} (SANTOS 2010). O diâmetro médio, neste caso também conhecido como diâmetro de Sauter, fica:

$$d_p = \frac{1}{\sum x_i / d_{pi}} \quad (1.4)$$

2.2. Velocidade mínima de fluidização — U_{mf}

Tradicionalmente obtém-se U_{mf} por meio de medidas da perda de carga através do leito, em função da velocidade do gás; ou por meio de fórmulas empíricas

Utilizaremos a equação de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U}{d_{sv}^2} + 1,75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U^2}{d_{sv}} \quad (1.5)$$

Onde:

μ é a viscosidade do fluido;

d_{sv} é o diâmetro da partícula;

ρ_g é densidade do fluido;

ε é a porosidade do leito;

L é a altura do leito;

ΔP é a queda de pressão do fluido através do leito;

U é a velocidade superficial

Seguindo o procedimento descrito em Geldart (1986), usando $U = U_{mf}$, e:

$$\frac{\Delta P}{L} = (\rho_p - \rho_g)(1 - \varepsilon)g \quad (1.6)$$

Combinamos as Equações 1.5 e 1.6, para obtermos:

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g d_{sv}} [(1135,7 + 0,0408Ar)^{1/2} - 33,7] \quad (1.7)$$

Onde, Ar é denominado número de Arquimedes e calcula-se como:

$$Ar = \frac{\rho_g d_{sv}^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (1.8)$$

A Equação 1.7 pode ser usada para partículas do tipo B e D e descreve uma boa maneira de calcular U_{mf} para um leito formado por partículas de formas regulares, ou que possam ser bem caracterizadas pelo uso da Equação 1.4.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir será tratado o passo-a-passo da caracterização das amostras, sua distribuição granulométrica, densidade real, aparente e porosidade, a fim de obtermos de modo experimental um valor para a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}).

3.1. Obtenção da distribuição granulométrica das amostras utilizadas

Foram utilizadas peneiras da ASTM (Mesh) de diferentes aberturas, em milímetros, para a separação dos materiais utilizados. A Tabela 3.1 mostra a relação utilizada entre a abertura e o tipo das peneiras com seu respectivo tamanho em milímetros.

Tabela 3.1 — Abertura (mm) das peneiras da ASTM (mesh), utilizadas para a granulometria.

Peneira (Mesh)	Abertura (mm)
18	1,00
20	0,84
25	0,71
35	0,59
40	0,50
45	0,42
50	0,35
60	0,25
70	0,21

Fonte: BBI Filtração (2013)

Com o conjunto de peneiras, as amostras foram caracterizadas com relação a sua granulometria. As Tabelas 3.2 a 3.7, relacionam o diâmetro médio das peneiras com a respectiva porcentagem de massa obtida de cada uma. A separação foi realizada com aproximadamente 1000 g de cada amostra.

Tabela 3.2 — Relação entre o diâmetro médio das peneiras e a porcentagem em massa da Alumina ALR 35/70.

Tipo de Material	Diâmetro Médio das Peneiras (mm)	Porcentagem em Massa (%)
Alumina ALR 35/70 (0,5/0,2mm) – (1000,43 ± 0,01)g	0,5	1
	0,43	33
	0,3	59
	0,25	7

Tabela 3.3 — Relação entre o diâmetro médio das peneiras e a porcentagem em massa da Alumina ALR 20/40.

Tipo de Material	Diâmetro Médio das Peneiras (mm)	Porcentagem em Massa (%)
Alumina ALR 20/40 (0,8/0,4mm) – (1000,48 ± 0,01)g	0,5	89,3
	0,43	9,8
	0,3	0,7
	0,25	0,3

Tabela 3.4 — Relação entre o diâmetro médio das peneiras e a porcentagem em massa da Areia 0,35/0,25mm.

Tipo de Material	Diâmetro Médio das Peneiras (mm)	Porcentagem em Massa (%)
Areia 0,35/0,25mm – (1000,57 ± 0,01)g	0,43	0,5
	0,3	90
	0,25	9,3

Tabela 3.5 — Relação entre o diâmetro médio das peneiras e a porcentagem em massa da Areia 0,5/0,35mm.

Tipo de Material	Diâmetro Médio das Peneiras (mm)	Porcentagem em Massa (%)
Areia 0,5/0,35mm – (1001,01 ± 0,01)g	0,75	2,5
	0,43	92,2
	0,3	5,2
	0,25	0,1

Tabela 3.6 — Relação entre o diâmetro médio das peneiras e a percentagem em massa da Areia 1/0,5mm.

Tipo de Material	Diâmetro Médio das Peneiras (mm)	Porcentagem em Massa (%)
Areia 1/0,5mm – (1000,55 ± 0,01)g	1	0,5
	0,75	69
	0,43	9,5
	0,3	12
	0,25	8,6

Tabela 3.7 — Relação entre o diâmetro médio das peneiras e a percentagem em massa da Areia Rolada.

Tipo de Material	Diâmetro Médio das Peneiras (mm)	Porcentagem em Massa (%)
Areia Rolada (0,8/0,4mm) – (1000,57 ± 0,01)g	1,2	0,3
	0,75	95
	0,43	4
	0,3	0,5
	0,25	0,2

Esta distribuição granulométrica pode ser visualizada nos gráficos do Anexo A. Pode-se analisar que a distribuição nem sempre é bem definida como consta do fabricante, o diâmetro de Sauter (Equação 1.4) nos ajuda a confirmar tal afirmação na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 — Relação entre o tipo de material utilizado e o diâmetro de Sauter calculado.

Tipo de Material	Diâmetro de Sauter (mm)
ALR 35/70 (0,5/0,2mm)	0,329
ALR 20/40 (0,8/0,4mm)	0,488
Areia 0,35/0,25mm	0,296
Areia 0,5/0,35mm	0,420
Areia 1/0,5mm	0,528
Areia Rolada (0,8/0,4mm)	0,720

Analisando esta tabela podemos concluir que a amostra de areia 1 / 0,5 mm possui um diâmetro de Sauter muito próximo da amostra de areia 0,5 / 0,35 mm. É fácil perceber, portanto, que a amostra de 1 / 0,5 mm possui muito mais partículas próximas de 0,5 mm que

de 1 mm, no momento da separação. Mais a diante iremos comparar o comportamento das amostras em relação aos testes fluidodinâmicos.

3.2. Obtenção das densidades das amostras

Determinou-se a densidade das amostras pelo método do picnômetro. Obteve-se a seguinte relação:

Tabela 3.9 — Densidade obtida para cada material analisado.

Material	Densidade (g/cm³)
ALR 0,5/0,2mm	3,38
ALR 0,8/0,4mm	3,10
Areia 0,35/0,25mm	2,17
Areia 0,5/0,35mm	2,17
Areia 1/0,5mm	2,15
Areia Rolada	2,17
Vidro 1/1,5 mm	2,18

Com isto, podem-se comparar as medidas realizadas com os resultados nominais aceitos comumente.

Tabela 3.10 — Densidade tabelada.

Material	Densidade (g/cm³)
Alumina	3,14 a 4,00
Sílica (dióxido de silício)	1,95 a 2,10

Fonte: Eurokation (2013)

Analisando as Tabelas 3.9 e 3.10 acima, nota-se que os resultados obtidos em laboratório das densidades dos materiais se aproximam dos resultados tabelados, uma vez que se obteve para a alumina (ALR) valores entre 3,10 g/cm³ e 3,38 g/cm³ e, para a areia e o vidro (dióxido de silício), valores entre 2,15 g/cm³ e 2,18 g/cm³.

3.3. Obtenção da porosidade das partículas

Como descrito no Capítulo 1 deste trabalho, existem zonas sem partículas em um leito poroso. A porosidade (ϵ) pode ser calculada tomando-se a razão entre o volume do leito que não está ocupado com material sólido e o volume total do leito. Obteve-se os seguintes valores para os sólidos:

Tabela 3.11 — Relação das porosidades obtidas para cada amostra.

Material	ϵ (%)
ALR 0,5/0,2mm	43
ALR 0,8/0,4mm	42
Areia 0,35/0,25mm	40
Areia 0,5/0,35mm	41
Areia 1/0,5mm	37
Areia Rolada	40
Vidro 1/1,5 mm	37,5

3.4. Obtenção da velocidade mínima de fluidização — U_{mf}

A etapa seguinte do projeto foi a obtenção da velocidade mínima de fluidização para cada amostra trabalhada. Esta velocidade foi calculada de dois modos distintos para serem comparados. Foram montados gráficos relacionando a perda de carga das amostras com a velocidade superficial do fluido utilizado na fluidização. A partir destes gráficos, obtemos a velocidade mínima de fluidização através da condição de perda de carga máxima. Para velocidades do gás maiores que U_{mf} , a perda de carga através do leito, atinge um valor que deve ser igual a razão entre o peso efetivo do leito, e sua área da secção transversal. O valor da perda de carga se mantém aproximadamente constante durante o intervalo de velocidades do gás, entre U_{mf} e a velocidade de transporte das partículas do leito (Santos, 2010). Esta velocidade mínima de fluidização pode, então, ser comparada com a obtida a partir das fórmulas empíricas vistas no Capítulo 2 deste trabalho.

3.4.1. Velocidade mínima de fluidização pelo método gráfico

Foi desenvolvida uma atividade prática para a obtenção dos gráficos utilizados para o cálculo de cada um dos valores de U_{mf} das amostras. Uma coluna vertical contendo o material

a ser fluidizado, conectada a uma válvula de controle da vazão do fluido utilizado, utilizando-se um manômetro para medir a variação de perda de carga (ΔP) do início ao fim do procedimento de fluidização. A Figura 3.1 ilustra o procedimento utilizado.

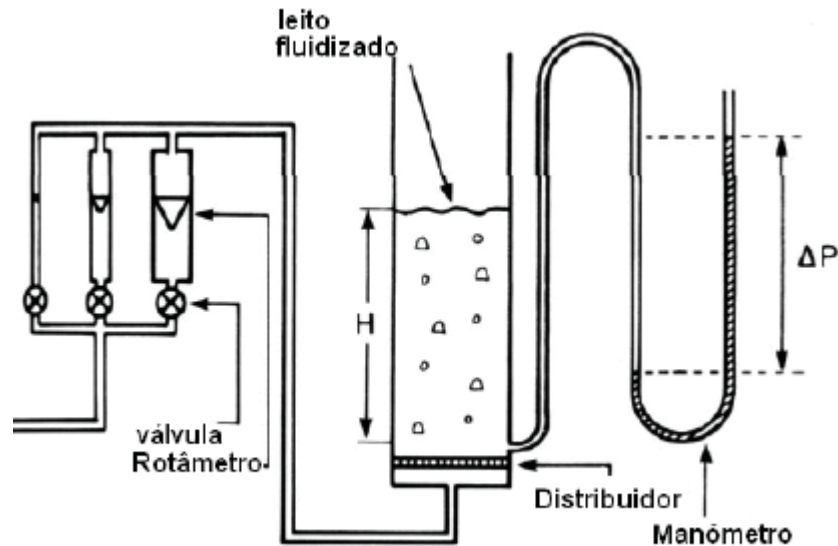


Figura 3.1 — Modelo do procedimento experimental.
Fonte: Bojorge (2009)

À medida que se ia aumentando a vazão do fluido, no caso, ar atmosférico, foi possível observar variação no valor de ΔP . Verificou-se que, conforme a velocidade do fluido ia crescendo, a perda de carga no manômetro também ia crescendo, até atingir certo pico, onde dizemos que o fluido estava fluidizado, e seguia com valores aproximadamente constantes até o fim do experimento. Este pico é o valor procurado para o momento o qual o fluido entra em estado fluidizado, em outras palavras, a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}). Para cada um dos sólidos, obtivemos gráficos distintos para seus valores de U_{mf} . Verificou-se que a velocidade mínima de fluidização é função direta da densidade e da granulometria da mistura. Estes gráficos podem ser consultados no Anexo B. Os testes foram detalhados para misturas desses sólidos e analisou-se o comportamento fluidodinâmico das misturas; a Tabela 3.11 contém a relação das velocidades mínimas de fluidização obtidas graficamente, para cada uma das amostras.

Figura 3.11 — Relação das velocidades mínimas de fluidização (U_{mf}) obtidas pelos gráficos.

Material	U_{mf} (m/s)
ALR 0,5/0,2mm	0,17
ALR 0,8/0,4mm	0,42
Areia 0,35/0,25mm	0,04
Areia 0,5/0,35mm	0,13
Areia 1/0,5mm	0,14
Areia Rolada	0,25
Vidro 1/1,5 mm	0,71
Vidro 1mm	0,68

Para um critério mais elaborado, decidiu-se comparar estes valores com os resultados da Fórmula 1.7.

3.4.2. Velocidade mínima de fluidização pelo método analítico

Recapitulemos as Fórmula 1.7 e 1.8 utilizadas para o cálculo de U_{mf} das partículas.

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g d_v} [(1135,7 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 33,7]$$

Sendo Ar ,

$$Ar = \frac{\rho_g d_v^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2}$$

Utilizando os valores obtidos para as densidades, conseguiu-se valores para U_{mf} que podem ser vistos na Tabela 3.12, estes valores podem ser comparados, com os dados obtidos dos gráficos do procedimento prático realizado anteriormente.

Figura 3.12 — Relação das velocidades mínimas de fluidização (U_{mf}) obtidas pelas fórmulas.

Material	U_{mf} (m/s)
ALR 0,5/0,2mm	0,08
ALR 0,8/0,4mm	0,19
Areia 0,35/0,25mm	0,07
Areia 0,5/0,35mm	0,10
Areia 1/0,5mm	0,12
Areia Rolada	0,17

Percebe-se que, com exceção do valor de U_{mf} obtido para a alumina ALR 0,8 / 0,4 mm, conseguimos uma boa aproximação desses dados, mostrando que ambos os métodos são confiáveis. Este erro pode ser relativo a observação da variação de ΔP , ou a variação de temperatura causada pelo motor de ar comprimido, lembrando que neste experimento e nos cálculos foram desconsideradas qualquer tipo de mudança de temperatura durante o procedimento, conforme Tabela 3.13.

Figura 3.13 — Comparação das velocidades mínimas de fluidização (U_{mf}) obtidas pelo método analítico (U_{mf1}) e pelo método gráfico (U_{mf2}).

Material	U_{mf1} (m/s)	U_{mf2} (m/s)
ALR 0,5/0,2mm	0,08	0,17
ALR 0,8/0,4mm	0,19	0,42
Areia 0,35/0,25mm	0,07	0,04
Areia 0,5/0,35mm	0,10	0,13
Areia 1/0,5mm	0,12	0,14
Areia Rolada	0,17	0,25

3.5. Comparando as amostras

Concluído o passo anterior, procurou-se comparar o comportamento de amostras com aspectos muito semelhantes ou muito diferentes entre si. Primeiramente foram comparadas curvas das amostras de densidades diferentes, porém de tamanhos muito próximos, no caso, comparou-se o gráfico da alumina ALR 0,8 / 0,4 mm com a areia rolada, com diâmetros de Sauter 0,788 mm e 0,720 mm respectivamente, conforme visto no Gráfico 3.1.

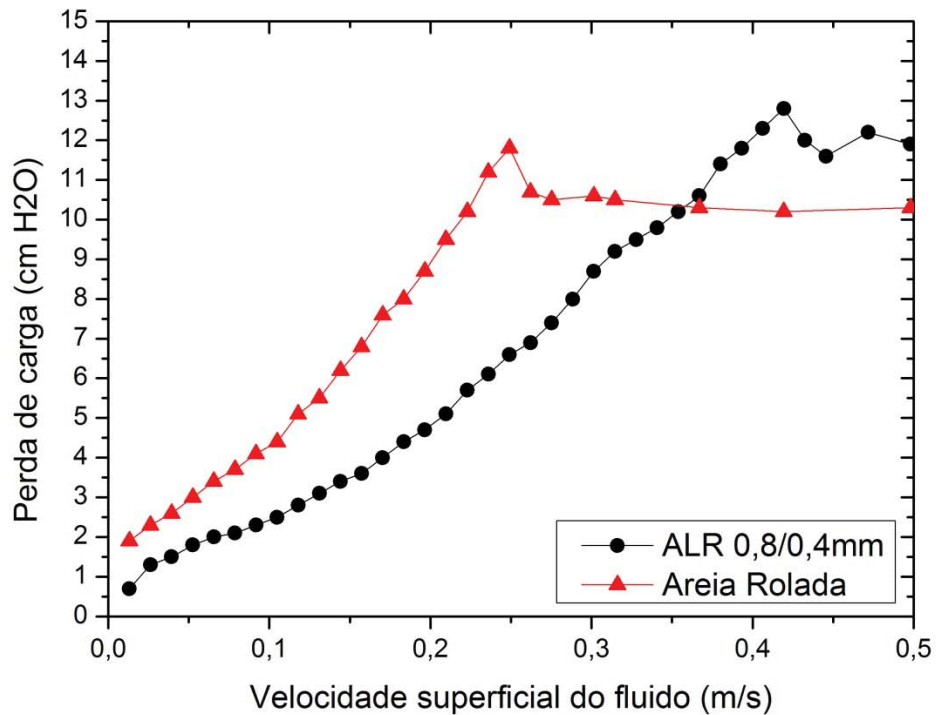


Gráfico 3.1 — Comparação das curvas das amostras de ALR 0,8/0,4mm e areia rolada.

Conclui-se que, como apresentado anteriormente, a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), está relacionada à densidade da partícula, uma vez que partículas de tamanhos tão próximos e densidades distintas, apresentam uma grande diferença no seu valor de U_{mf} .

Seguidamente, foram tomadas partículas de densidades muito próximas, como as aluminas ALR 0,5 / 0,2 mm e ALR 0,8 / 0,4 mm, porém, com tamanhos bem distintos, calculados pelo diâmetro de Sauter, 0,329 mm e 0,788mm, respectivamente, como podemos analisar no Gráfico 3.2.

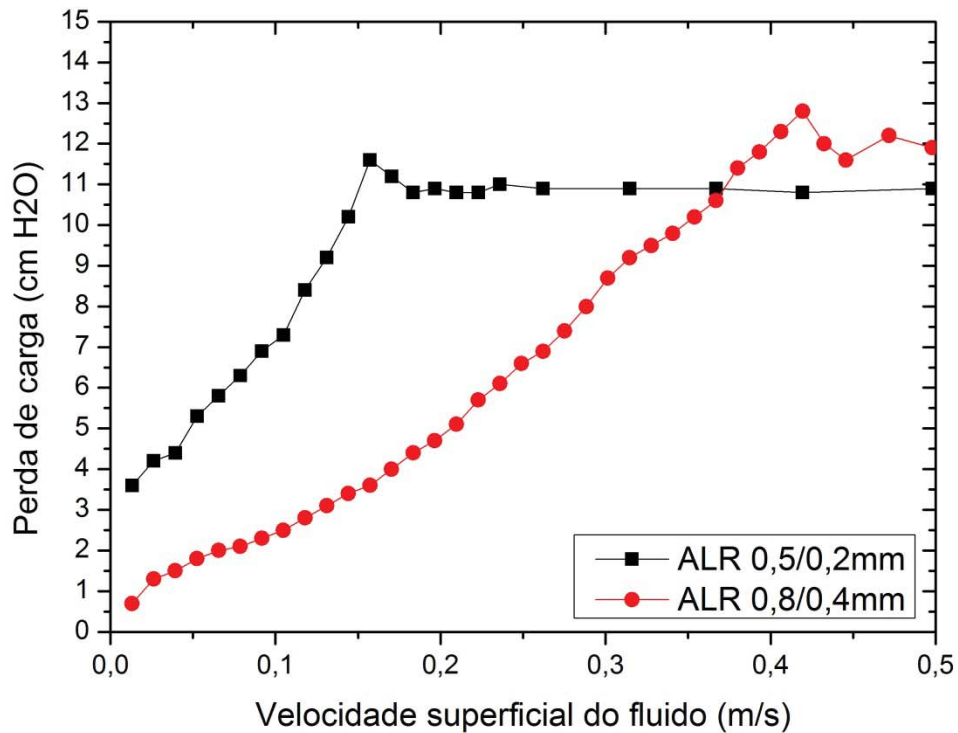


Gráfico 3.2 — Comparação das curvas das amostras das aluminas.

Embora possuam uma densidade muito próxima, cerca de 3 g/cm^3 , nota-se uma grande variação da U_{mf} na comparação de suas curvas. Conclui-se que o tamanho das amostras influencia, na velocidade mínima de fluidização. O mesmo ocorreu na comparação entre os diferentes tamanhos de areia, Gráfico 3.3, de densidades muito próximas, porém com distintas velocidades mínimas de fluidização.

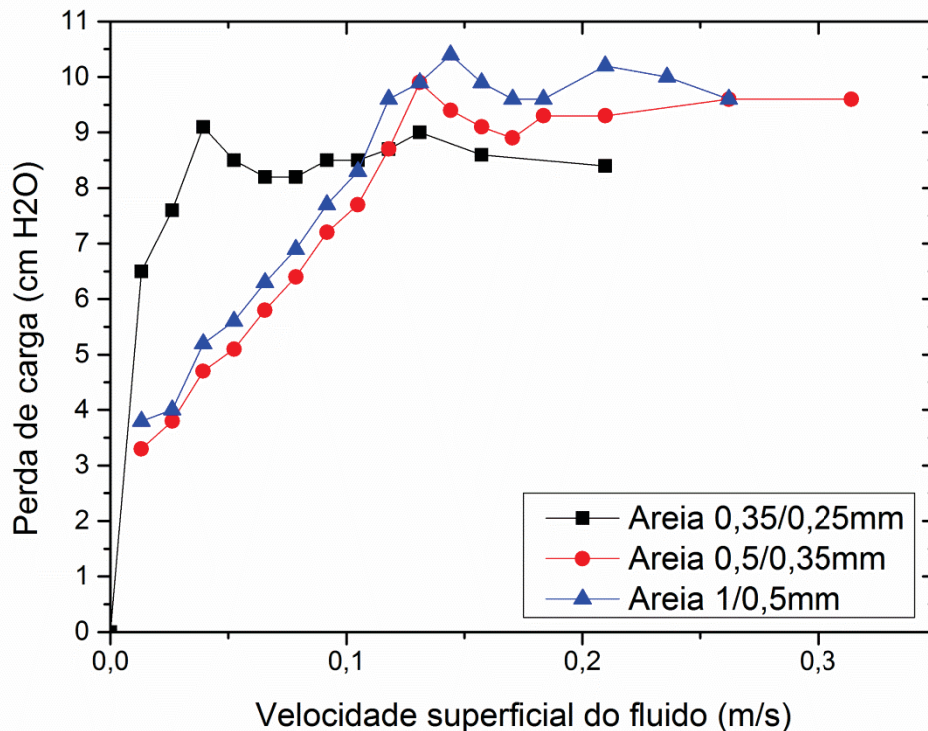


Gráfico 3.3 — Comparação das curvas das amostras das areias.

Quanto maior a partícula, maior a velocidade mínima de fluidização para vencer a inércia das partículas do leito. Curiosamente, a areia de 0,35 a 0,5 mm se comporta de modo parecido com a de 0,5 a 1,00 mm. Isto de fato acontece devido aos seus diâmetros de Sauter de 0,420 a 0,520 mm respectivamente, distantes do valor de 0,296 mm da areia de 0,25 a 0,35 mm, mostrando que, assim como visto na comparação das aluminas, o tamanho também influencia na velocidade mínima de fluidização.

Outra comparação interessante é da areia de 0,5 a 1,00 mm com a areia rolada, que possuem uma densidade muito próxima. Sua relação, exposta no Gráfico 3.4, nos mostra a variação de U_{mf} entre um e outro sólido, devido ao seu tamanho que, teoricamente seriam muito parecidos, porém o diâmetro de Sauter mostrou o contrário, aproximando mais a areia 1/0,5 mm da areia 0,5/0,35 mm.

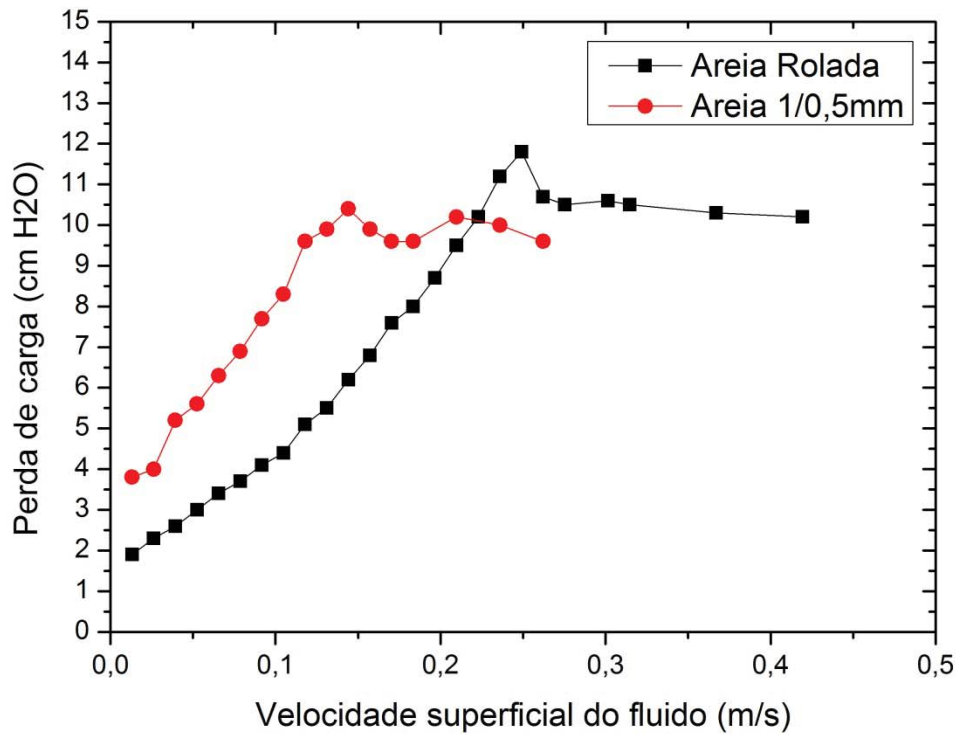


Gráfico 3.4 — Comparação das curvas das amostras de areias distintas.

Ao fim dessas comparações, é possível concluir que a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) está diretamente relacionada tanto ao tamanho da partícula, quanto à sua densidade.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que o valor da velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) depende do padrão de distribuição granulométrica do material do leito e também depende do tamanho e da densidade das partículas fluidizadas, conforme observado nos gráficos e nas tabelas de comparação de cada uma das amostras, contendo sólidos de densidades e tamanhos muito próximos ou diferentes e, que para velocidades maiores que U_{mf} , nota-se um decaimento por perda de carga (que ocorre após a fluidização inicial do leito) depois de certo pico após a fluidização do leito. Observa-se nos gráficos presentes no Anexo B, que a velocidade mínima de fluidização é determinada pela condição onde a perda de carga atinge um máximo, após o qual fica aproximadamente constante.

Comprovou-se, por fim, todo o fundamento básico de fluidização que fora estudado durante todo o projeto, bem como a qualificação do procedimento experimental que se aproximou muito dos dados obtidos analiticamente, como foi visto ao longo do Capítulo 3. As leis físicas envolvidas nas fórmulas batem com o modelo utilizado, até mesmo desprezando-se alguns parâmetros, como no caso da troca de calor entre as partículas, o leito e o fluido.

A comparação entre as amostras foi satisfeita, comprovando nossos modelos propostos das leis estudadas analiticamente e experimentalmente, concluindo, assim, todos nossos objetivos.

5. REFERÊNCIAS

BBI FILTRAÇÃO. **Granulometria**. BBI Filtração. 2004. Disponível em: < http://www.bbifiltracao.com.br/down.php?cat=12&form=pdf&nome=Tabela_de_Granulometria_Carvo_Ativado > Acesso em out. 2013.

BOJORGE, N. **Fluidização**. Rio de Janeiro: Escola de Engenharia Química. 2009. Disponível em: < http://www.eq.ufrj.br/docentes/ninoska/docs_PDF/Fluidizacao_09.pdf > Acesso em: set. 2013.

EUROAKTION. **Densidade dos Materiais**. Euroaktion. 2005. Disponível em: < <http://www.euroaktion.com.br/Tabela%20de%20Densidade%20dos%20Materiais.pdf> > Acesso em set. 2013.

GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**. Wiley, New York. 1986.

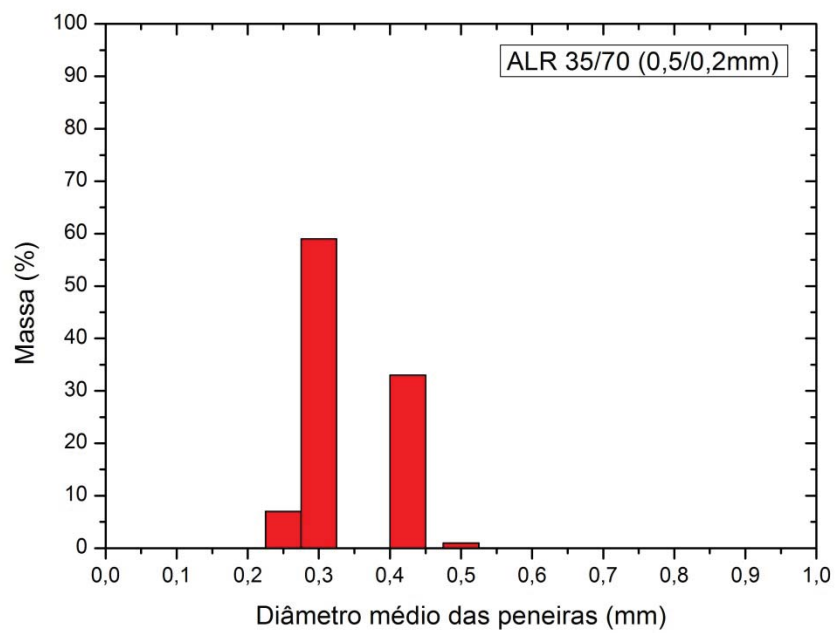
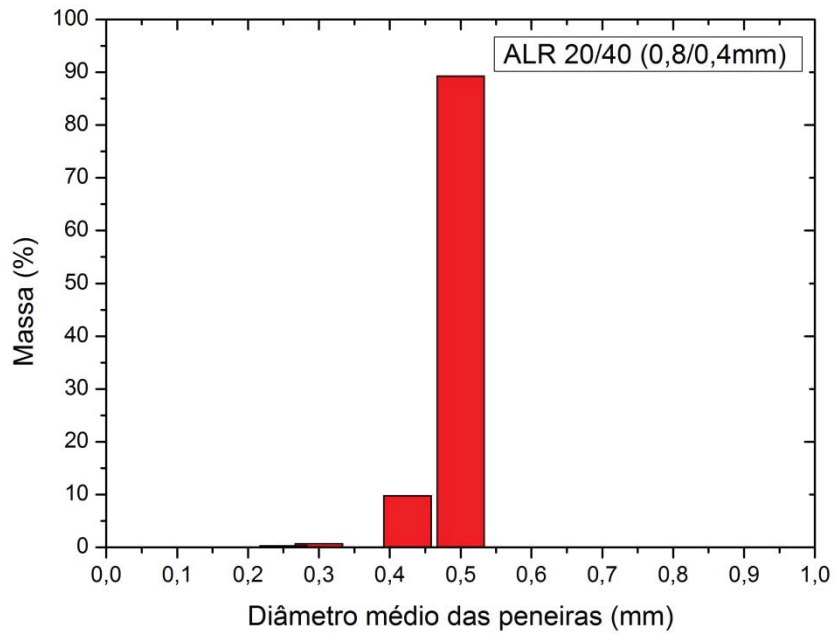
KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. USA: Butterworth-Heinemann, 1991.

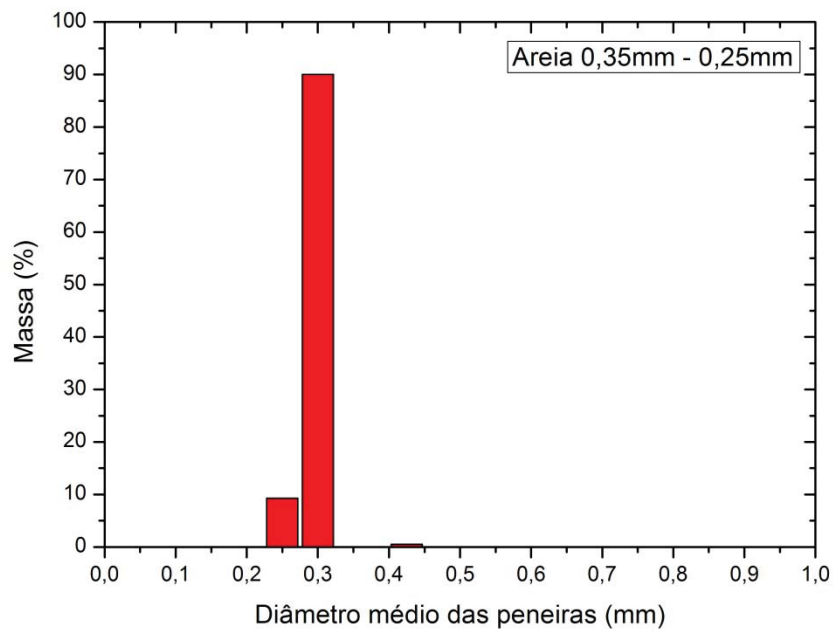
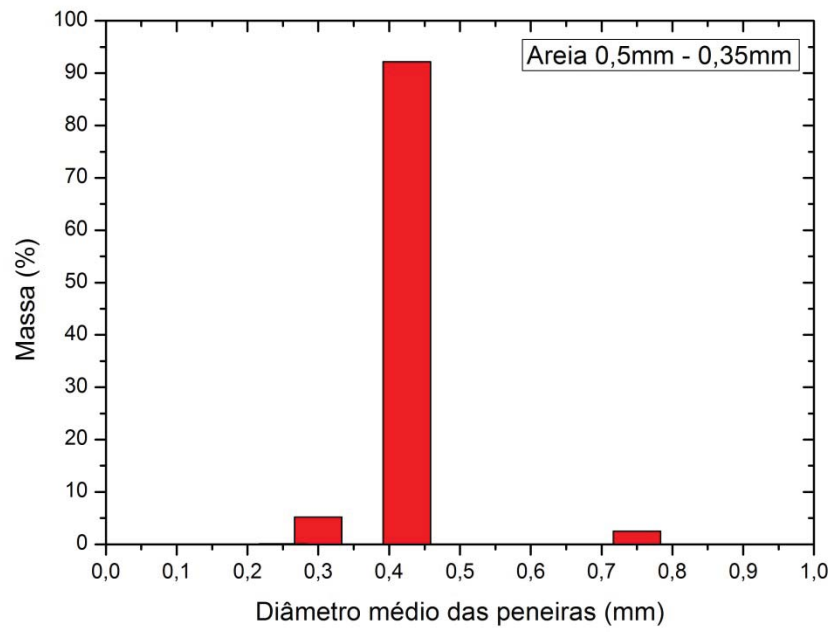
NITZ, M.; GUARDANI, R. Fluidização Gás-Sólido: Fundamentos e Avanços. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, São Paulo. 2008.

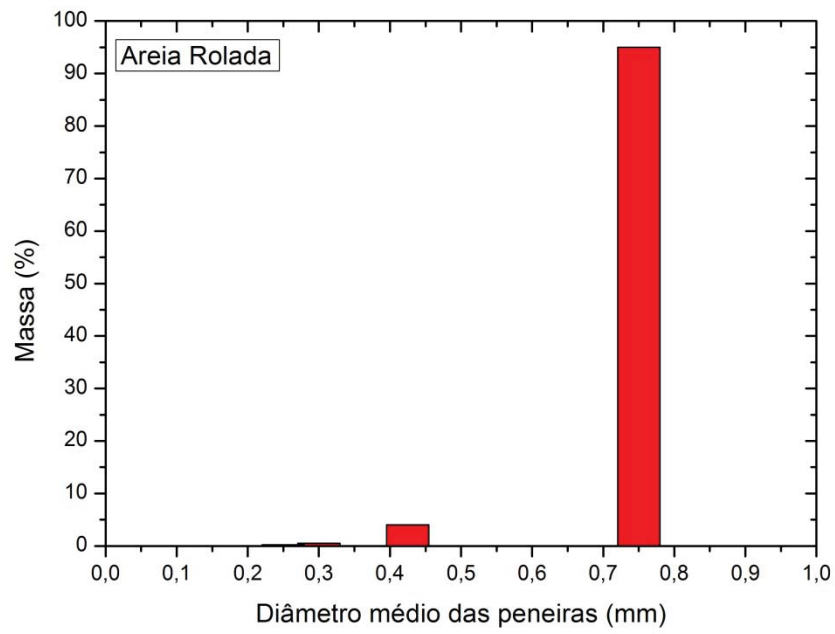
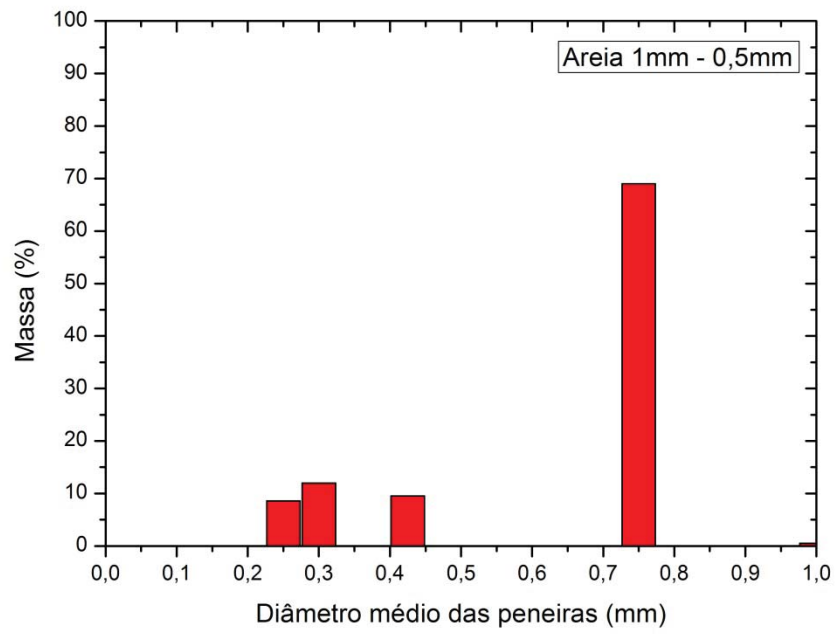
SANTOS, F. J. Tecnologia da Gaseificação de Biomassa. In: _____. (Org.). **Fluidodinâmica de Leito Fluidizado Aplicada à Gaseificação**. 2010. Cap. 14.

6. ANEXOS

6.1. Anexo A — Gráficos de distribuição granulométrica







6.2. Anexo B — Gráficos da velocidade mínima de fluidização (U_{mf})

